

学校编码: 10384  
学号: 19820081152990

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**GaN 基垂直结构 LED 关键工艺研究**

**Research of key technologies for vertical structure**

**GaN-based LED**

江 方

指导教师姓名: 张保平教授

专 业 名 称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2011 年 6 月

论文答辩时间: 2011 年 6 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2011 年 6 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- (        ) 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。
- (        ) 2. 不保密，适用上述授权。

声明人（签名）：

年        月        日

## 摘要

GaN 基发光二极管 (LED) 是发展固态照明、实现人类照明革命的关键性光源, 具有广阔的应用前景。由于其衬底蓝宝石为绝缘体, 以及结构上的原因, 不可避免地存在电流的横向扩展, 从而极易产生电流拥挤效应, 导致器件散热不良、出光率低等问题。垂直结构的 GaN 基 LED 和传统结构 LED 相比, 具有电流分布均匀、电流产生的热量小、电压降低、效率高等诸多优点。所以该结构被提出后, 迅速受到研究人员的关注, 并取得了一系列进展。但是和传统结构 LED 相比, 垂直结构 LED 工艺难度比较大, 存在许多挑战, 特别是制作高反射率电极、台面刻蚀以及漏电流抑制。在本论文中, 我们制作出了垂直结构 LED 的高反射率电极, 同时研究了工艺中的关键技术, 简化了工艺。具体的研究内容如下:

1. 提出利用 Ni/Ag/Ti/Au 结构作为 p-GaN 电极和底部反射镜。通过研究 Ni 层厚度、退火温度以及退火时间对反射率的影响, 制作出了具有高反射率的 p 型欧姆接触电极, 在 465nm 波长处反射率达到 94%, 比接触电阻为  $7.0 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$ 。

2. 采用俄歇电子能谱 (AES) 测试了不同元素随深度分布情况, 对 Ni/Ag/Ti/Au 高反射欧姆接触电极的形成机理进行了系统分析, 阐明了各层金属的作用以及随实验条件的变化规律。

3. 样品电镀后, 利用能量密度  $640 \text{ mJ/cm}^2$  的激光进行剥离, 剥离后 GaN 表面平整, 通过 AFM 观察到的表面均方根粗糙度为 9.2nm。

4. 利用区域化电镀, 优化键合时粘结剂的厚度, 成功实现了区域剥离, 简化了制作工艺, 制作出了垂直结构 LED。

**关键词:** 垂直结构 GaN 基 LED, 高反射率电极, 区域剥离

## Abstract

GaN-based light-emitting diode (LED) is a key light source for solid-state lighting, and it has been applied in many fields. When sapphire is used as the substrate, a number of issues are still present including the current crowding effect, the poor heat dissipation and low illuminance, etc. Compared with the traditional GaN-based LED, vertical structure LED exhibits several advantages including current smoothing, high heat dissipation, low forward voltage, high light output power and so on. Since this vertical structure was proposed, researchers have paid much attention on it and a series of progress have been made. However, the fabrication of vertical structure LED is difficult, and it is a challenge to achieve high reflective contact and avoid leakage current. In the present work, we fabricate high reflective contact on p-GaN, and investigate key technologies for device fabrication. The main contents are summarized as the follows:

1. A metallization scheme of Ni/Ag/Ti/Au has been developed for obtaining high reflective contact on p-GaN. We studied samples with various Ni thickness, annealing temperature and annealing time, improving the reflectivity up to 94% (465nm). The contact resistance of  $7.0 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$  was obtained.
2. We analyzed the formation mechanism of high reflective and Ohmic from Auger electronics spectrum depth profiles. The action of each metal layer, and the impact of different experimental conditions on contact were investigated
3. The lift-off process was performed by using  $640 \text{ mJ/cm}^2$  laser energy with optimized wafer bonding. The root-mean-square of surface roughness of 9.2nm was obtained.
4. The experimental conditions of selective electroplating process and wafer bonding were studied. The vertical structure LED has been achieved by using patterned laser lift-off technology.

**Key words:** vertical structure LED, high reflective contact, patterned laser lift-off

# 目录

第一章 绪论.....	1
1.1 GaN 的结构和性质.....	1
1.2 GaN 基 LED 的发展现况.....	3
1.3 垂直结构 LED 的研究现状.....	5
1.4 垂直结构 LED 的工艺难点.....	8
1.5 本文的研究内容和结构安排.....	10
参考文献.....	11
第二章 表征方法.....	15
2.1 扫描电子显微镜 (SEM) .....	15
2.2 俄歇能谱 (AES) .....	16
2.3 原子力显微镜 (AFM) .....	18
2.4 分光光度计 (Spectrophotometer) .....	20
参考文献.....	22
第三章 p 型 GaN 高反射率电极的研究.....	24
3.1 p 型 GaN 高反射率电极形成机理.....	24
3.1.1 欧姆接触形成机制.....	24
3.1.2 p 型 GaN 电极的高反射机理.....	28
3.2 电极反射率和电阻率的测量方法.....	29
3.3 p 型 GaN 高反射率电极的制备流程.....	31
3.4 p 型 GaN 高反射率电极的测试结果与分析.....	33
3.5 本章小结.....	42
参考文献.....	44

第四章 垂直结构 LED 制备工艺研究.....	46
4.1 电镀镍技术.....	46
4.2 键合及激光剥离技术.....	49
4.3 区域剥离技术.....	52
4.4 带有高反射率电极的垂直结构 LED 的制作.....	57
4.5 本章小结.....	59
参考文献.....	61
第五章 结论与展望.....	63
硕士期间发表的论文.....	65
致谢.....	66

## Contents

<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 The structure and properties of GaN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 An overview of GaN-based LED.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 The progress of vertical structure LED.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 The problem of fabricate vertical structure LED.....</b>	<b>8</b>
<b>1.5 Main work and structure frame of this thesis.....</b>	<b>10</b>
<b>References.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapter 2 Characterization methods.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Scanning electronics microscope (SEM).....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Auger electronics spectrum (AES).....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Atomic force microscope (AFM).....</b>	<b>18</b>
<b>2.4 Spectrophotometer.....</b>	<b>20</b>
<b>References.....</b>	<b>22</b>
<b>Chapter 3 Research of high reflective contact on p-GaN.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Mechanics of high reflective contact on p-GaN.....</b>	<b>24</b>
3.1.1 Mechanics of forming ohmic contact.....	24
3.1.2 Mechanics of forming high reflective contact on p-GaN.....	28
<b>3.2 Measurement of reflectance and specific contact</b>	
<b>resistance.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3 Fabrication of high reflective contact on p-GaN.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4 Results of high reflective contact on p-GaN.....</b>	<b>33</b>
<b>3.5 Summary.....</b>	<b>42</b>



<b>References.....</b>	<b>44</b>
<b>Chapter 4 Fabrication techniques of vertical structure LED.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 Technology of Ni electroplating.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2 Technology of wafer bonding and laser lift-off.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3 Technology of patterned laser lift-off.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4 Fabrication of vertical structure LED with high</b>	
<b>reflective contact .....</b>	<b>57</b>
<b>4.5 Summary.....</b>	<b>59</b>
<b>References.....</b>	<b>61</b>
<b>Chapter 5 Conclusion and prospects.....</b>	<b>63</b>
<b>Publications.....</b>	<b>65</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>66</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 GaN 的结构和性质

在半导体产业发展中, Ge、Si 一般被称为第一代半导体。1960 年出现的化合物半导体 GaAs、GaP、InP 及其合金被称为第二代半导体, 而近期出现的宽禁带 ( $E_g > 2.3\text{eV}$ ) 的化合物半导体材料被称为第三代半导体, 主要包括 SiC、II-VI 族 (ZnO、ZnSe) 和 III-V 族 GaN 基材料 (c-BN、GaN、AlN), 以及金刚石薄膜等。它们是高温微电子器件和蓝绿光以及紫外光电器件的基础材料, 近年来受到人们的普遍重视, 发展迅速<sup>[1,2]</sup>。

无论在光学性质, 还是在电学性质方面, 第三代半导体都具有传统半导体不具备的优点。以 Si 为材料的高功率半导体器件, 由于在高温、高频以及导热特性上的不足, 已经无法符合越来越苛刻的功率应用方面的需求。与第一代、第二代半导体材料相比, III-V 材料的禁带更宽, 饱和电子速率更高, 击穿电压更大, 化学性质更稳定, 耐高温, 耐腐蚀, 很好的弥补了传统半导体材料本身固有的缺点, 引起了越来越多的关注, 成为未来取代 Si 的高功率半导体材料。

在 GaN 成为研究的热点之前, SiC 和 ZnSe 在相当长的时间内一直是宽禁带材料研究和开发的重点。虽然 SiC 具有诸多优点, 例如耐化学腐蚀、抗辐射、高温稳定性好等, 但该材料是间接带隙材料, 其蓝光 LED 的发光亮度很低, 可是 SiC 蓝光 LED 在 GaN 蓝光 LED 实现商业化之前仍是唯一的商品化的蓝光 LED 产品; 而 ZnSe 基材料由于实现了蓝光 LD, 更是视为重点材料, 该材料的带隙虽覆盖绿色和蓝色波长范围, 但目前的实践表明, 其发光器件的寿命比较短 (蓝光 ZnSe LD 寿命约为几个小时)。

III 族氮化物, 主要包括 GaN、AlN、InN、AlGaIn、GaInN、AlInN 和 AlGaInN 等, 其禁带宽度覆盖了红、黄、绿、紫和紫外光谱范围。在通常情况下, GaN 及其有关化合物一般以三种晶体结构形式存在: 具有六方对称性的纤锌矿结构 (Wurtzite), 和立方对称的闪锌矿结构 (Zincblende), 以及岩盐矿结构 (Rocksalt)。三种结构如图 1.1 所示。六方对称的纤锌矿结构是 GaN、AlN、InN 及相关化合物的稳定结构, 其单胞包含四个原子。具有立方对称性的闪锌矿结构为亚稳相, 具有立方单胞。食盐结构是一种只有在高压情况下才存在的相。GaN

晶格常数和带隙宽度如图 1.2 所示。

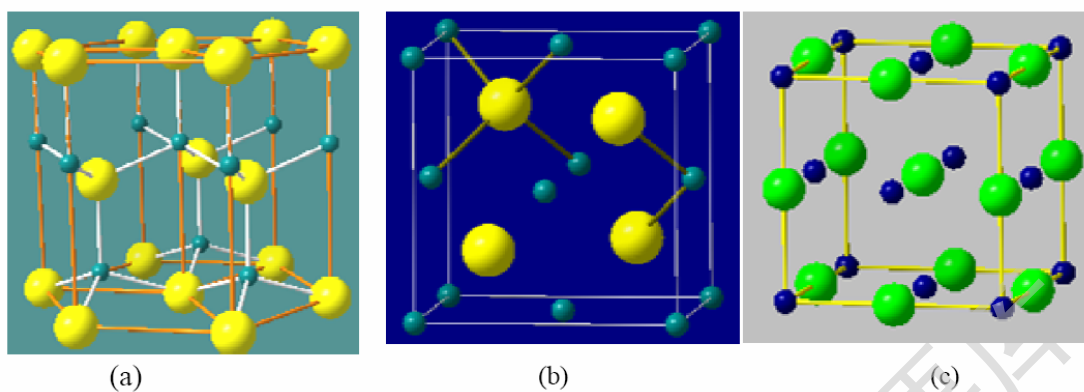


图 1.1 GaN 材料的三种基本结构: (a)纤锌矿结构 (b) 闪锌矿结构 (c)岩盐矿结构

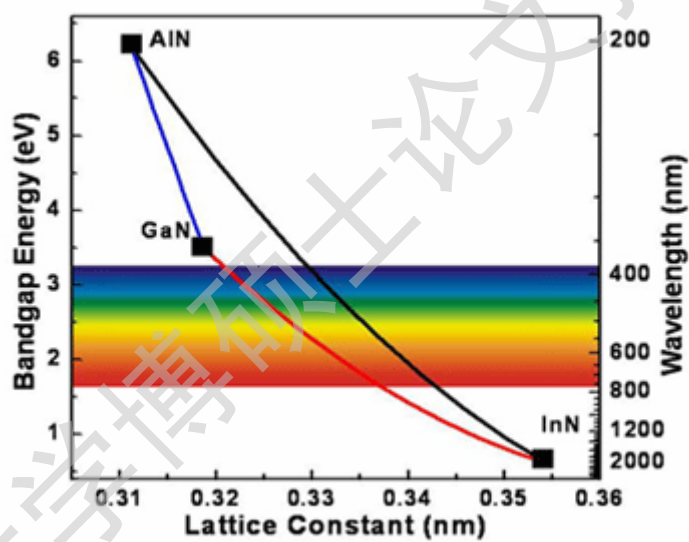


图 1.2 GaN 晶格常数和带隙宽度

归纳文献上的报道，我们将 GaN 的基本材料特性列于表 1.1 中<sup>[3-13]</sup>。

表 1.1 六方纤锌矿 GaN 晶体的基本参数

	GaN
禁带宽度 (eV)	$E_g(300K)=3.39$ $E_g(1.6K)=3.50$
温度系数 (eV · K <sup>-1</sup> )	$dE_g / dT = -6.0 \times 10^{-4}$
压力系数 (eV · MPa <sup>-1</sup> )	$dE_g / dP = 4.2 \times 10^{-5}$

热膨胀系数 ( $\text{K}^{-1}$ )	$\Delta\alpha / \alpha = 5.59 \times 10^{-6}$ $\Delta c / c = 3.17 \times 10^{-6}$
热导率 ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	1.3
折射率	$n(1\text{eV}) = 2.33$
分解温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	850
自发极化常数 ( $\text{cm}^{-2}$ )	-0.029
介电常数	9.5
电子亲和能 (eV)	4.1
晶格参数	$a=3.189$ $c=5.185$

III 族氮化物的物理与化学性质十分稳定，具有相当强的化学键。以 GaN 而言，除了室温下不溶于水、酸和碱外，也具有高熔点和高机械强度的性质。所以 III 族氮化物不仅在发光元件上占有重要地位，也适合在恶劣环境（高温、辐射、腐蚀）下的各种电子元件应用。

## 1.2 GaN 基 LED 的发展现况

世界上第一个 GaN LED 是在 1972 年由 Pankove<sup>[14]</sup>报道，采用的是 MIS 结构，通过控制 n 型层中掺入的 Zn 的浓度来控制所发射的光的波长，减少 Zn 的浓度可以使波长蓝移；蓝光和绿光也同时制造出来。通过 Mg 掺杂，紫光区域的二极管也可以实现<sup>[15]</sup>。第一个 p-n 结 GaN LED 于 1989 年制成。第一个商用的 GaN LED 是由日本的 Nichia 公司研制成功<sup>[16]</sup>。我国最早开展氮化物研究的是中科院长春物理所，1987 年采用 VPE 技术在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  外延生长 GaN。1993 年，北京大学采用 MOCVD 技术，开展氮化物的研究。随后中科院半导体所，中科院北京物理所，信息产业部 13 所，南京大学，南昌大学，大连理工大学也相继开展氮化物材料生长和器件应用的研究。国内 863 新材料领域于 1994 年开始部署了以 LED 为目标的 GaN 课题。“九五”期间部署了以 LED 和高温微电子器件为目标的 GaN 基课题。

众多国际大公司加强了对 LED 的投资与研究开发，如首尔半导体、日本

Nichia、Philips、Lumileds、美国CREE 等,其中日本Nichia公司在1991年研制出同质结GaN蓝色LED,峰值波长达到430nm,光谱半宽为55nm,其光输出外量子效率约为0.18%。其结构是:在(0001)面蓝宝石 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 衬底上,先生长 $25\mu\text{m}$ 的GaN过渡层,生长 $0.8\mu\text{m}$ 的硅掺杂n-GaN,再生长约 $4\mu\text{m}$ 的镁掺杂p型GaN。1992年日本Nichia公司研制出世界上第一只GaN基商用蓝光LED,在全世界范围内掀起了氮化物的研究热潮。1994年Nichia公司研发出InGaN/AlGaIn双质结(DH)高亮度蓝色LED。p型GaIn为欧姆接触层,生长之后在 $700^\circ\text{C}$ 的 $\text{N}_2$ 气氛下进行热处理来改善其质量。在芯片制造过程中,首先局部刻蚀掉顶部的p型GaIn层,直到露出n-GaIn为止;接着分别将Ni/Au和Ti/Al蒸发到n-GaIn和p-GaIn上形成接触电极;最后将片子切成一个个管芯,贴装在引线框架上进行封装。这种InGaIn/AlGaIn双质结(DH)高亮度蓝光二极管的峰值波长为450nm,光谱半宽仅为70nm,外量子效率为5.4%,正向电压为3.6V,最大为4V。20mA下的光输出功率达到3mW,发光强度也非常大,是性能指标都非常好的蓝光二极管产品<sup>[17,18]</sup>。随着MOCVD技术和GaIn材料在LED产品中的大量应用,目前LED已经实现了全彩化和高亮度化。尤其是20世纪90年代初出现的GaIn基蓝绿光LED,作为应用III-V族氮化物材料的重要发光器件之一,具有高亮度、能耗低、寿命长,响应快、无辐射等优点,其发展极为迅速,10年间发光效率增长了100倍。随着超高亮度AlGaInP红光LED和InGaIn蓝光LED的实用化,使可见光LED的应用领域由室内拓展到室外,由单色显示发展为彩色显示,信息显示的密度在不断提高,信息显示的距离在逐步由近及远。全色超高亮度LED的实用化和商品化,使照明技术面临一场新的革命,由多个超高亮度红、蓝、绿三色LED组成的像素管,不仅可以发出波长连续可调的各种色光,而且还可以发出亮度达几十到一百烛光的白色光成为照明光源<sup>[19]</sup>。对于相同发光亮度的白炽灯和LED像素管来说,后者的功耗只占前者的10%~20%,白炽灯的寿命一般不超过2000小时,而LED灯的寿命长达数万小时。公路、铁路的交通信号灯、警示灯、标志灯和各类汽车的指示灯,用超高亮度LED取代加滤光片的白炽灯泡,不仅响应速度快,寿命长、抗震、耐冲击,而且效率高、节省电能。超高亮度LED将有可能成为一种很有竞争力的新型电光源。利用GaIn基蓝、紫光LED芯片和荧光粉制作的白光LED流明效率已经超过了白炽灯,达到 $85\sim 90\text{lm/W}$ <sup>[20,21]</sup>,使得LED逐渐进入普通照明领域成为可

能，而且其流明效率仍在不断提高，如图1.3<sup>[22]</sup>。白光LED以其节能环保、长寿命、全固态、体积小等诸多优势已经在仪器设备照明、飞机照明、汽车照明、移动电话、装饰照明得到广泛应用。因为半导体照明诱人的发展前景，美、日、欧盟等发达国家和地区都由政府组织启动了LED 照明计划。日本在1998年在世界率先开展“21 世纪光计划”，通过使用寿命长、更薄、更轻的GaN高效蓝光和紫外LED技术，使得照明能量效率提高到传统荧光灯的两倍。其后美国的“国家半导体照明计划”、欧盟的“彩虹计划”等，也将LED照明计划列入国家法案。我们国家也于2003 年6 月17 日，由科技部牵头正式启动中国“国家半导体照明工程”。

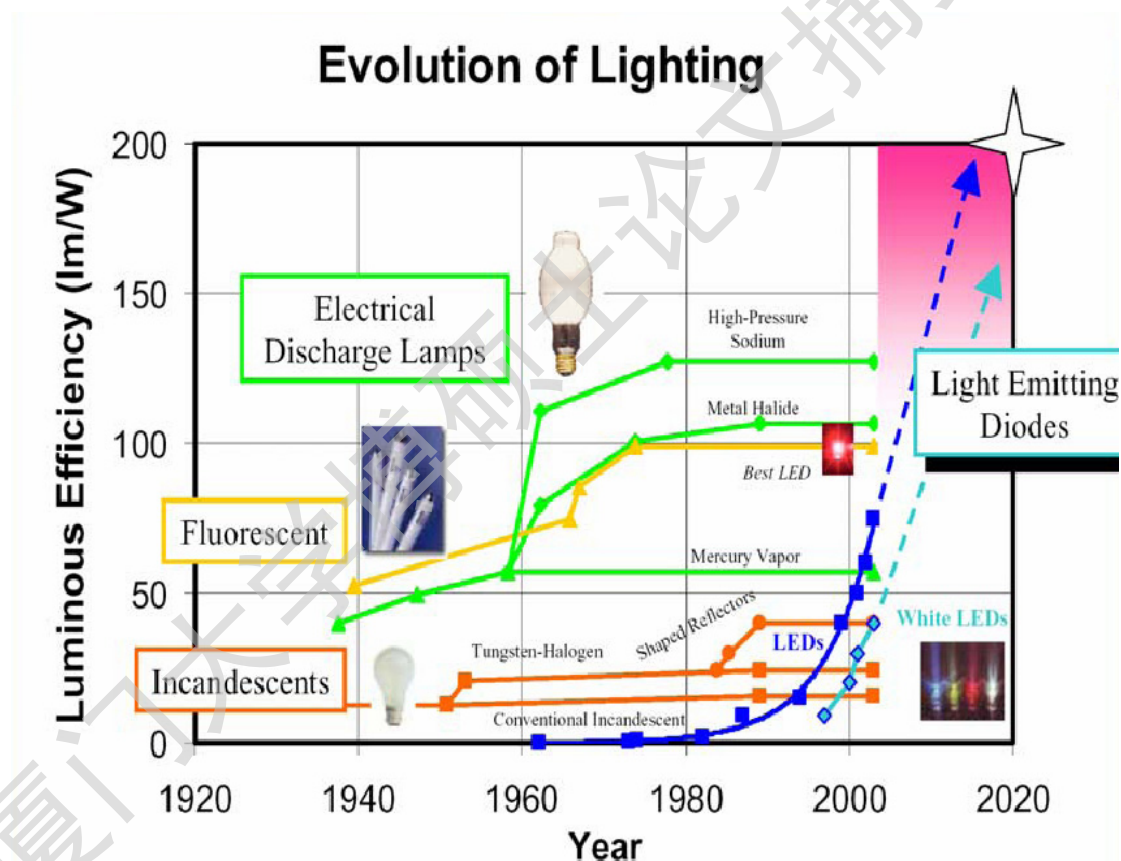


图 1.3 未来 LED 亮度趋势<sup>[22]</sup>

### 1.3 垂直结构 LED 的研究现状

GaN 材料是重要的III-V族化合物半导体材料，GaN 基发光二极管(LED)是发展固态照明、实现人类照明革命的关键性光源，具有广泛的应用前景。目前商

品化的 LED 生产主要采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 的方法在蓝宝石衬底上外延得到。由于其衬底蓝宝石为绝缘体, 所以必须通过刻蚀器件表面形成台面结构<sup>[23,24]</sup>, p 型电极和 n 型电极在同一侧, 不可避免地存在电流的横向扩展, 从而极易产生电流拥挤效应 (Current-crowding Effect) <sup>[25,26]</sup>。这将导致 LED 发光、发热不均匀, 使用寿命下降等问题<sup>[27-30]</sup>。对于大面积的大功率 LED, 电流拥挤更加严重。传统的顶出射 LED 的电光转换效率还没有达到取代荧光照明的水平。因此, 提高 LED 的电光转换效率是非常重要的, 电光转换效率取决于内量子效率、出光效率。在常规顶出射 LED 中, 出光效率主要受限于半透明的电流扩展层和 p 型电极对光的吸收。而通过减少透明电极的光吸收来提高出光效率与降低 p 型电流接触电阻是相互制约的, 常规顶出射 LED 的出光效率也因此不能得到进一步提高<sup>[31-34]</sup>。传统横向结构式 LED 在高效率、高功率的提升上仍深受限制。

电流拥挤效应可以用电流沿 x 轴的分布表示, 如图 1.4。在靠近 n 型电极的 p 电极的边缘 ( $x=0$ ), 电流最大, 电流拥挤。在  $x>0$  的位置, 电流随着 x 增大而减小, 因此, 电流分布不均匀, 不能充分利用发光层的材料。同时电流拥挤效应会加速器件的老化, 这个主要原因可能包括: (1) 由于 n 型 GaN 具有一定的电阻, 台面边缘局部区域会产生过多的焦耳热, 热量不能有效扩散; (2) 局部区域电流密度大, 使得金属的电迁移在局部比较严重, 加速了器件退化。这种电流拥挤效应会随着器件老化而更加严重, 形成恶性循环, 最终使得器件失效<sup>[35]</sup>。

垂直结构 GaN 基 LED 的两个电极分别在 GaN 基 LED 的两侧, 如图 1.5 所示, 由于图形化电极和全部的 p-GaN 作为第二电极, 使得电流几乎全部垂直流过 GaN 外延层, 没有横向流动的电流。因此, 电阻降低, 没有电流拥挤现象, 电流分布均匀, 充分利用了发光层的材料, 使得电流产生的热量减小, 电压降低, 发光均匀, 效率提高。

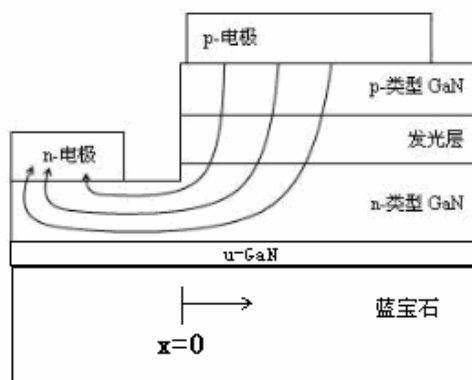


图 1.4 传统横向结构式 LED



图 1.5 垂直结构 LED

垂直结构 GaN 基 LED 具有比传统结构 LED 更多的优点，使用具有高热导率支撑衬底的垂直结构 GaN 基 LED，还具有导热性能高的优点。目前，国内外都在对垂直结构 GaN 基 LED 工艺进行研究。台湾国立成功大学 Yang 等人<sup>[20]</sup>，提出结合激光剥离(Laser lift-off)蓝宝石衬底与电镀 Ni 技术，制作垂直结构 LED。制作出的 12mil-LED 器件在 20mA 的正向偏压比传统器件降低 0.1-0.2V，串联电阻更是减少大概 50%，在 20mA 的工作电流条件下的光输出功率，最多可比传统器件增加 185%。制作出的大面积（40mil x 40mil）垂直结构 LED，在 350mA 的工作电流条件下，光输出功率甚至比传统结构 LED 增加 226%，并且其串联电阻要比传统结构 LED 降低 30%以上。为了使 LED 的出光效率达到取代荧光照明的水平，提高 LED 的出光效率是非常重要的，对于 LED 来说，出光效率越高，相对的热产生就会越少。但是不幸的是，大部分传统结构 LED 的出光效率只有



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库